ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2024. Том 91. № 11. С. 12–23
OPTICHESKII ZHURNAL. 2024. V. 91. № 11. P. 12–23
Научная статья
Research Article
Оптический журнал
Формирование, обработка и распознавание изображений
Image formation, processing and recognition
DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-12-23
УДК 621.397

Иерархическая система списков для обнаружения и сопровождения точечных слабоизлучающих объектов по последовательности изображений

Павел Александрович Меденников[1]✉, Николай Ильич Павлов[2]

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., Россия

[1]*medennik@rambler.ru* *https://orcid.org/0009-0002-3463-2113*
[2]*pavlovNI@niioep.ru* *https://orcid.org/0000-0002-1641-8319*

Аннотация

Предмет исследования. Задача обнаружения и сопровождения движущихся слабоизлучающих точечных объектов. **Цель работы.** Разработка метода обработки последовательности изображений для устойчивого обнаружения и сопровождения объектов с низкими значениями отношения сигнала к шуму. **Метод.** Основной особенностью предложенного метода обработки последовательности изображений является оперирование с иерархической системой списков: списком целей, инициальным списком и буферным списком. В расположенный на нижнем уровне иерархии буферный список вносятся все отметки, обнаруженные в ходе внутрикадровой обработки изображений и не нашедшие соответствия с объектами из указанных списков. При успешном соответствии кадровой отметки с объектом буферного списка он переносится в инициальный список. Там собираются кандидаты на «завязывание» траекторий, которые при подтверждении соответствующего условия переносятся в список целей. Используются различные правила сопоставления кадровых отметок с объектами указанных списков, правила пересчета траекторных и энергетических характеристик, а также различные условия сохранения объекта в списке. **Основные результаты.** Предложен метод, который позволяет обнаруживать и отслеживать объекты с низкой вероятностью обнаружения на единичном кадре. Работоспособность предложенного метода подтверждается проведенными статистическими экспериментами. **Практическая значимость.** Применение разработанного метода позволит повысить дальность обнаружения и устойчивость сопровождения движущихся слабоизлучающих точечных объектов системами обнаружения, работающими в режиме реального времени.

Ключевые слова: обнаружение точечных объектов, сопровождение объектов, обработка последовательности изображений, траекторная обработка, иерархическая система списков, сопоставление отметок

Ссылка для цитирования: Меденников П.А., Павлов Н.И. Иерархическая система списков для обнаружения и сопровождения точечных слабоизлучающих объектов по последовательности изображений // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 12–23. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-12-23

Код OCIS: 100.4999

A hierarchical list system for detecting and tracking point weakly emitting objects by image sequence

Pavel A. Medennikov[1]✉, Nikolai I. Pavlov[2]

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

[1]*medennik@rambler.ru* *https://orcid.org/0009-0002-3463-2113*
[2]*pavlovNI@niioep.ru* *https://orcid.org/0000-0002-1641-8319*

Abstract

Subject of study. The problem of detection and tracking of point weakly emitting moving objects. **Aim of study.** Development of an image sequence processing method for stable detection and tracking of objects with low signal-to-noise ratios. **Method.** The main feature of the proposed image sequence processing method is the operation with a hierarchical list system: a list of targets, an initial list and a buffer list. All marks found during intra-frame image processing and which did not associate with the objects from these lists are entered in the buffer list located at the lower level of the hierarchy. If the frame mark successfully associates with the buffer list object, it is transferred to the initial list. Candidates for track initiation are gathered there, and are transferred to the list of targets upon confirmation of the corresponding condition. Various rules are used for association of frame marks with objects in these lists, rules for recalculating track and energy characteristics, as well as various conditions for holding an object in the list. **Main results.** A method is proposed that allows objects with a low probability of detection on a single frame to be detected and tracked. The efficiency of the proposed method is confirmed by the conducted statistical experiments. **Practical significance.** Application of the developed method will increase the detection range and stability of tracking poorly visible objects in real-time detection systems.

Keywords: point target detection, target tracking, images sequence processing, track maintenance, data association

For citation: Medennikov P.A., Pavlov N.I. A hierarchical list system for detecting and tracking point weakly emitting objects by image sequence [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 11. P. 12–23. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-12-23

OCIS code: 100.4999

ВВЕДЕНИЕ

Для систем обнаружения, отслеживания и идентификации объектов, работающих в режиме реального времени на предельных дальностях обнаружения, весьма важным является использование вычислительно эффективных методов и алгоритмов, позволяющих решать поставленные задачи по последовательности кадров (изображений) с низким отношением сигнал/шум (ОСШ). В указанных условиях изображения обнаруживаемых объектов в плоскости матричного фотоприемного устройства (МФПУ) оптико-электронной системы, как правило, не превышают размеры фоточувствительного элемента, т.е. объекты являются точечными. Методы обнаружения и отслеживания точечных объектов по последовательности изображений можно разделить на две большие группы.

Первую группу составляют традиционные двухуровневые методы, в которых на нижнем уровне выполняется обработка единичного кадра с выделением отметок потенциальных объектов и оценкой их координат и энергии, а на верхнем уровне — сопоставление кадровых отметок с траекториями отслеживаемых объектов и завязывание новых траекторий для отметок, сопоставление с которыми не произошло [1–6]. Согласно теоретическим оценкам (см., например [7]) при решении задач обнаружения точечных объектов с неизвестными характеристиками для достижения вероятности обнаружения объекта на уровне 0,95 при вероятности ложной тревоги 0,01 ОСШ

их на кадре должно быть не менее 10. Работа с последовательностями кадров, обладающих меньшими значениями ОСШ, приводит к существенному росту ложных отметок (шумовых выбросов) и заметному снижению вероятности обнаружения на отдельном кадре, что, в свою очередь, вызывает пропуск объектов на кадровой последовательности. Эффективность методов обнаружения и отслеживания точечных объектов в этом случае будет определяться способом фильтрации ложных отметок и устойчивостью к пропуску объектов при анализе кадровой последовательности.

Методы другой группы, получившие название «*Track-Before-Detect*» (TBD) — «сопровождение до обнаружения» (см. [8–16]), решают задачу поиска треков (следов) объектов на ограниченной последовательности кадров с принятием решения об обнаружении и оценкой параметров движения объектов по результатам обработки на основе всей накопленной информации. В результате методы этой группы могут работать с последовательностями кадров, имеющих низкие значения ОСШ, вплоть до значений, меньших единицы (см., например [15, 16]. Платой за такие возможности является огромный объем выполняемых вычислений, для сокращения которого предлагается использовать априорную информацию о количестве обнаруживаемых объектов, их энергетических и/или кинематических характеристиках. Однако, несмотря на достигнутые успехи, применение методов TBD в системах реального времени на современном этапе развития вычислительной техники ограничено из-за необходимости обработки огромного объема информации. Кроме того, методы TBD характеризуются инерционностью принимаемых решений, определяемой длиной анализируемой последовательности кадров, которая тем длиннее, чем ниже значения ОСШ составляющих ее кадров.

Целью представляемой работы являлась разработка метода обработки последовательности изображений для устойчивого обнаружения и сопровождения объектов с низкими значениями ОСШ.

Предлагаемый в настоящей статье эвристический подход является развитием метода [1], приближающий обнаружительные возможности традиционного подхода к возможностям методов TBD. В работе [1] для «фильтрации» ложных отметок, выделяемых внутрикадровым алгоритмом обнаружения, и ложных траекторий, которые образуются из связываемых между собой ложных отметок, применяется буферный список, а в основной список вносятся обнаруженные объекты со статистически значимыми характеристиками.

Предложенный в настоящей работе метод более эффективен нежели метод [1] в контексте сокращения количества кадров, необходимых для достижения заданной вероятности обнаружения (вероятности попадания в список целей), при близкой к нулевому значению вероятности ложной тревоги. Заданная вероятность обнаружения определяется решаемой задачей и обычно лежит в диапазоне от 0,900 до 0,999.

Особенность предлагаемого подхода — оперирование при обработке последовательности кадров с иерархической системой списков объектов: списком целей, инициальным и буферным списками. Расположенный на нижнем уровне иерархии буферный список теперь служит только для фильтрации ложных кадровых отметок. Буферный список стал самоочищающимся: при его заполнении новая отметка заносится поверх самой старой. Отпадает необходимость очищения списка после завершения очередной минисерии. Инициальный список предназначается для фильтрации ложных траекторий. В этом списке новые траектории дожидаются выполнения условия статистической достоверности и при его выполнении переносятся в список целей (основной список в терминологии работы [1]). В зависимости от иерархии списка используются различные правила сопоставления кадровых отметок, правила пересчета траекторных и энергетических характеристик, а также различные условия сохранения объекта в списке.

Работоспособность предложенного метода подтверждается проведенными статистическими экспериментами с использованием временно́й последовательности модельных кадров. Показано, что применение предлагаемого подхода позволяет заметно сократить время, необходимое для достижения заданной вероятности обнаружения (вероятности попадания объекта в список целей).

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассматриваемая процедура обработки последовательности кадров оперирует с тремя списками — списком целей, инициальным и буферным. Для элементов списков рассчитываются параметры, которые описывают кинематические и энергетические характеристики, ряд дополнительных признаков идентификации на их основе. Рассчитываемые параметры включают: количество обнаружений j-го объекта $n_{\mathrm{D}j}$, время его последнего обнаружения t_j, среднюю мощность сигнала $P_{\mathrm{G}j}$ и оценку текущей локальной мощности P_j, оценку текущих координат (x_j, y_j) и проекций скорости (v_{xj}, v_{yj}), стартовые координаты (x_{0j}, y_{0j}) и время первого обнаружения t_{0j}, среднее расхождение предсказанных и измеренных положений объекта Δd_j, показатель статистической значимости оцениваемых параметров $k_{\mathrm{S}j}$. Для выявления объектов, не представляющих интереса (например, звезд, если фоном является звездное небо), вычисляются такие дополнительные параметры как показатель поперечного смещения координат $k_{\mathrm{D}j}$ и показатель приближения объекта $k_{\mathrm{M}j}$. Правила их подсчета приведены ниже. Первоначально все списки пусты.

При обработке очередного кадра временно́й последовательности выполняются следующие действия:

1. Обработка текущего кадра с формированием списка отметок (обнаруженных в кадре потенциальных объектов наблюдения), определением их координат и оценкой энергии отметки в отсчетах МФПУ (например с помощью алгоритма [17]). После завершения обработки кадра формируется список отметок, в котором энергия объекта, соответствующего i-ой отметке, пересчитывается в мощность P_i путем деления на время формирования кадра.

2. Для каждого объекта в списке целей выполняется поиск ближайшей отметки с проверкой условия соответствия, задаваемого формулой (2). Если условие выполняется, то параметры объекта пересчитываются с учетом его текущих характеристик (характеристик отметки) по соотношениям (3)–(6). Отметки, сопоставленные с каким-либо из объектов списка целей, удаляются из списка отметок текущего кадра. Объекты, для которых справедливо условие (7), удаляются из списка целей.

3. Для каждого объекта в инициальном списке выполняется поиск ближайшей отметки с проверкой условия соответствия, задаваемого формулой (2). Если условие выполняется, то параметры объекта пересчитываются с учетом его текущих характеристик по соотношениям (8), (9), (5) и (6). Если для объекта инициального списка выполнено условие (10), то он переносится в список целей. Объекты, для которых справедливо условие (11), удаляются из инициального списка. Отметки, сопоставленные с каким-либо из объектов инициального списка, удаляются из списка отметок текущего кадра.

4. Для каждого объекта в буферном списке выполняется поиск ближайшей отметки с проверкой условия соответствия, задаваемого формулой (12). Если условие выполняется, то параметры объекта пересчитываются с учетом его текущих характеристик по соотношениям (13), (14), (5), а сам объект переносится в инициальный список. Все отметки, сопоставленные с каким-либо из объектов буферного списка, удаляются из списка отметок текущего кадра.

5. Оставшиеся отметки инициируют создание новых объектов в буферном списке, при этом параметры объектов устанавливаются в соответствии с выражениями (15).

Близость отметок к j-му объекту из списка целей или инициального списка определяется по прогнозируемому положению объекта на текущем кадре $(x_{j\mathrm{E}}, y_{j\mathrm{E}})$, рассчитываемому исходя из текущих траекторных параметров,

$$x_{j\mathrm{E}} = x_j + v_{xj}\left(t_i - t_j\right),\ \ y_{j\mathrm{E}} = y_j + v_{yj}\left(t_i - t_j\right), \quad \textbf{(1)}$$

где t_i — время формирования текущего кадра.

Критерий близости i-ой кадровой отметки к j-му объекту из списка целей или инициального списка определяется следующим выражением:

$$\sqrt{\left(x_{j\mathrm{E}} - x_i\right)^2 + \left(y_{j\mathrm{E}} - y_i\right)^2} + d_P < d_{\mathrm{T}} + \Delta d_j,$$
$$d_P = k_P \frac{\left|P_i - P_j\right|}{P_i + P_j}, \quad \textbf{(2)}$$

где d_P — штраф по дистанции, накладываемый за расхождение энергетических харак-

теристик кадровой отметки и объекта списка и определяемый параметром чувствительности k_P, который задается в долях от дистанции, соответствующей линейному размеру элемента МФПУ, d_{T} — пороговое значение близости элемента списка целей, определяемое точностью оценки координат кадровым алгоритмом и точностью оценки скорости объекта, Δd_j — среднее расхождение предсказанных и измеренных положений объекта. k_P является параметром алгоритма, при обработке последовательности модельных кадров использовалось значение $k_P = 0{,}33$.

Из всех отметок, удовлетворяющих условию (2), с j-ым объектом связывается отметка с минимальным значением критерия близости (значение левой части неравенства (2)). В случае присутствия в кадровой последовательности нескольких объектов вероятной становится ситуация, когда одна и та же отметка будет «ближайшей» к различным объектам списка. Возникает задача оптимального сопоставления кадровых отметок с отслеживаемыми траекториями (задача о назначениях при селекции в траекторной обработке) [2–4, 18]. Поскольку даже оптимальные алгоритмы решения этой задачи не свободны от ошибок, мы просто позволяем приписывать одну и ту же отметку нескольким объектам списка.

При связывании i-ой кадровой отметки с j-ым объектом из списка целей характеристики объекта пересчитываются следующим образом.

Устанавливается значение коэффициента усиления k_{I} для пересчета характеристик объекта, определяемое количеством обнаружений объекта n_{I}, которое необходимо для переноса его в список целей (при обработке серий тестовых кадров использовалось значение $n_{\mathrm{I}} = 5$)

$$k_{\mathrm{I}} = \frac{1}{n_{\mathrm{I}}}. \tag{3}$$

Пересчитываются координаты j-го объекта как взвешенная сумма прогнозируемых координат и координат i-ой отметки и с их учетом пересчитываются оценки скорости j-го объекта

$$x_j = x_{j\mathrm{E}} + k_{\mathrm{I}}\left(x_i - x_{j\mathrm{E}}\right),\ \ y_j = y_{j\mathrm{E}} + k_{\mathrm{I}}\left(y_i - y_{j\mathrm{E}}\right),$$

$$v_{x,\mathrm{new}} = v_{xj} + \frac{k_{\mathrm{I}}}{2}\left(\frac{x_j - x_i}{\left(t_i - t_j\right)} - v_{xj}\right),\ \ v_{xj} = v_{x,\mathrm{new}},$$

$$v_{y,\mathrm{new}} = v_{yj} + \frac{k_{\mathrm{I}}}{2}\left(\frac{y_j - y_i}{\left(t_i - t_j\right)} - v_{yj}\right),\ \ v_{yj} = v_{y,\mathrm{new}}, \tag{4}$$

$$\Delta d_j = \Delta d_j + k_{\mathrm{I}}\left(\sqrt{\left(x_{j\mathrm{E}} - x_i\right)^2 + \left(y_{j\mathrm{E}} - y_i\right)^2} - \Delta d_j\right),$$

где $v_{x,\mathrm{new}}$ и $v_{y,\mathrm{new}}$ — значения составляющих скорости j-го объекта, которые рассчитываются как взвешенная сумма текущих значений и оценок, получаемых по координатам i-ой отметки.

Инкрементируется число обнаружений и устанавливается время последнего обнаружения

$$n_{\mathrm{D}j} = n_{\mathrm{D}j} + 1\,,\ t_j = t_i\,. \tag{5}$$

Пересчитываются энергетические характеристики

$$P_{\mathrm{new}} = P_j + k_{\mathrm{I}}\left(P_i - P_j\right),\ \ P_j = P_{\mathrm{new}},$$

$$P_{\mathrm{Gnew}} = P_{\mathrm{G}j} + \frac{1}{n_{\mathrm{D}j}}\left(P_i - P_{\mathrm{G}j}\right),\ \ P_{\mathrm{G}j} = P_{\mathrm{Gnew}}, \tag{6}$$

где P_{new} и P_{Gnew} — соответственно оценка текущей локальной мощности и средняя мощность сигнала j-го объекта, которые рассчитываются как взвешенная сумма текущих значений и оценок, получаемых по оценке мощности i-ой отметки.

Показатель статистической значимости оцениваемых параметров $k_{\mathrm{S}j}$, показатели поперечного смещения $k_{\mathrm{D}j}$ и приближения $k_{\mathrm{M}j}$ рассчитываются так же, как в работе [1].

После завершения пересчета характеристик всех объектов в списке целей отметки, связанные с каким-либо из объектов, удаляются из списка отметок текущего кадра. Из списка целей удаляются все объекты, у которых время с момента последнего обнаружения превысило пороговое значение t_{TL}

$$t_i - t_j > t_{\mathrm{TL}}. \tag{7}$$

Процедура связывания оставшихся кадровых отметок с объектами инициального списка выполняется аналогичным образом.

С j-ым объектом инициального списка связывается отметка с минимальным значением критерия близости (значение левой части неравенства (2)), удовлетворяющим условие (2). Если такая отметка нашлась, характеристики объекта пересчитываются следующим образом.

Рассчитывается значение коэффициента усиления k_{I}

$$k_{\mathrm{I}} = \frac{1}{n_{\mathrm{D}j}}. \tag{8}$$

Кинематические характеристики объекта определяются следующим образом:

$$\begin{gathered} x_j = x_i,\ y_j = y_i, \\ v_{xj} = \frac{x_i - x_{0j}}{\left(t_i - t_{0j}\right)},\ v_{yj} = \frac{y_i - y_{0j}}{\left(t_i - t_{0j}\right)}. \end{gathered} \tag{9}$$

В соответствии с выражениями (5) и (6) пересчитываются прочие характеристики объекта. Показатели статистической значимости оцениваемых параметров $k_{\mathrm{S}j}$, поперечного смещения $k_{\mathrm{D}j}$ и приближения $k_{\mathrm{M}j}$ не рассчитываются.

При выполнении следующего условия j-ый объект из инициального списка переносится в список целей

$$n_{\mathrm{D}j} \geq n_{\mathrm{I}}. \tag{10}$$

После завершения пересчета характеристик всех объектов инициального списка отметки, связанные с каким-либо из объектов, удаляются из списка отметок текущего кадра. Из инициального списка удаляются все объекты, для которых выполняется следующее условие:

$$t_i - t_j > n_{\mathrm{D}j} t_{\mathrm{IL}}. \tag{11}$$

где t_{IL} — пороговое значение, равное удвоенному времени между соседними кадрами.

Процедура связывания оставшихся кадровых отметок с объектами буферного списка выполняется аналогичным образом.

Критерий близости i-ой кадровой отметки к j-му объекту из буферного списка задается следующим выражением:

$$\sqrt{\left(x_j - x_i\right)^2 + \left(y_j - y_i\right)^2} < d_{\mathrm{B}}, \tag{12}$$

где d_{B} — пороговое значение близости для элемента буферного списка, которое определяется предполагаемой поперечной скоростью объектов и погрешностью оценивания координат кадровым алгоритмом.

С j-ым объектом буферного списка связывается отметка с минимальным значением критерия близости (значение левой части неравенства), удовлетворяющим условию (11). Если такая отметка нашлась, характеристики объекта пересчитываются следующим образом.

Рассчитываются оценки составляющих скорости j-го объекта и устанавливается начальное значение расхождения предсказанных и измеренных положений объекта

$$\begin{gathered} v_{xj} = \frac{x_j - x_i}{\left(t_i - t_j\right)},\ v_{yj} = \frac{y_j - y_i}{\left(t_i - t_j\right)}, \\ \Delta d_j = \frac{\sqrt{v_{xj}^2 + v_{yj}^2}}{2} \Delta t, \end{gathered} \tag{13}$$

где Δt — интервал времени между соседними кадрами, с.

В соответствии с выражением (5) инкрементируется число обнаружений и устанавливается время последнего обнаружения.

Значения прочих параметров определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{gathered} x_j = x_i,\ y_j = y_i,\ P_j = P_{\mathrm{G}j} = \frac{P_i + P_{\mathrm{G}j}}{2}, \\ k_{\mathrm{S}j} = 0,\ k_{\mathrm{D}j} = 0,\ k_{\mathrm{M}j} = 0. \end{gathered} \tag{14}$$

После пересчета значений параметров j-ый объект из буферного списка переносится в инициальный список.

После завершения пересчета характеристик всех объектов буферного списка отметки, связанные с каким-либо из объектов, удаляются из списка отметок текущего кадра. Каждая оставшаяся отметка инициирует создание нового объекта в буферном списке. При этом характеристики этого объекта задаются следующим образом:

$$\begin{gathered} n_{\mathrm{D}j} = 1,\ t_{0j} = t_j = t_i,\ x_{0j} = x_j = x_i, \\ y_{0j} = y_j = y_i,\ P_j = P_{\mathrm{G}j} = P_i. \end{gathered} \tag{15}$$

В заключение данного раздела сформулируем пару ограничений применения представляемого алгоритма: между двумя соседними

обнаружениями движение объекта может отличаться от линейного в пределах погрешности, задаваемой пороговым значением d_T; межкадровое смещение объекта не должно превышать значение $d_B/(n_B - 1)$, где n_B — среднее количество кадров до полного обновления буферного списка.

ОЦЕНКИ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ) РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТОДА

По аналогии с работой [1] оценим динамику роста вероятности обнаружения (вероятности попадания в список целей) относительно вероятности обнаружения на единичном кадре p_{fr} с ростом числа обработанных кадров.

По завершению обработки k последовательных кадров возможны варианты исходов с общим числом обнаружений объекта от 0 до k. Вероятность исходов с максимальным числом обнаружений, равным k, $p_{k,k}$, и вероятность необнаружения объекта (нулевого числа обнаружений) $p_{k,0}$ определяются по следующим формулам:

$$p_{k,k} = p_{fr}^{k}, \quad p_{k,0} = (1 - p_{fr})^{k}. \tag{16}$$

Вероятности промежуточных исходов с числом обнаружений $i = 1, \ldots, k-1$ определяются по следующей итерационной формуле:

$$p_{k,i} = p_{fr}\, p_{k-1,i-1} + (1 - p_{fr})\, p_{k-1,i}, \tag{17}$$

где вероятности с первым индексом $(k-1)$ — это вероятности, оцененные по предыдущему кадру.

Вероятность попадания объекта в список целей эквивалентна вероятности выполнения двух условий: попадания в инициальный список и не удаления из него по условию (11). Для k-го кадра, начиная со второго (поскольку в инициальный список попадают объекты с числом обнаружений, равным 2), вероятность попасть в инициальный список и сохраниться в нем определяется по следующей формуле:

$$p_{Ik} = \sum_{i=2}^{k} p_{k,i} \left(1 - p_{2i,0}\right). \tag{18}$$

Количество кадров, по которым рассчитывается вероятность нахождения в инициальном списке, ограничивается средним количеством кадров до полного обновления буферного списка n_B. Для всех кадров с номерами,

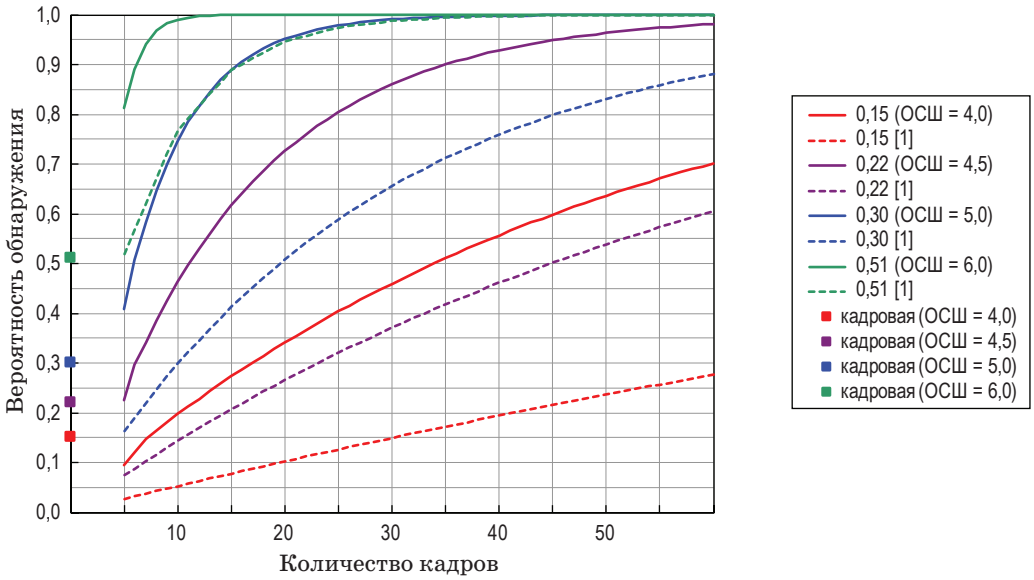


Рис. 1. Зависимости вероятности обнаружения от числа обработанных кадров в тестовых последовательностях с ОСШ от 4 до 6 (соответствующие кадровые вероятности обнаружения от 0,15 до 0,51) представляемым алгоритмом (сплошные линии) и алгоритмом [1] (пунктирные линии)

Fig. 1. Dependences of the detection probability vs the number of processed frames in test sequences with a signal-to-noise ratio from 4 to 6 (corresponding frame detection probabilities from 0.15 to 0.51) by presented algorithm (continuous lines) and algorithm [1] (dotted lines)

большими n_B, вероятность обнаружения определяется по следующей итерационной формуле:

$$p_{Dk} = p_{D(k-1)} + \left(1 - p_{D(k-1)}\right) p_{\text{fr}} p_{In_B}, \quad (19)$$

где p_{In_B} определяется по формуле (18) с $k = n_B$.

На рис. 1 приведены графики роста вероятности обнаружения для кадров с ОСШ от 4 до 6, соответствующие вероятности обнаружения на единичном кадре от 0,15 до 0,51 (на графике обозначены точками на оси ординат). При расчетах значение n_B приравнивалось 5 (длине тестовой минисерии в работе [1]). Видно, насколько быстрее растет вероятность обнаружения при использовании представляемого метода по сравнению с предшественником. Сокращение времени (числа кадров), необходимого для достижения требуемого значения вероятности обнаружения, трактуемой как вероятность попадания объекта в список целей, является существенным преимуществом представляемого алгоритма по сравнению с его предшественником [1]. Заметим, что при кадровой вероятности обнаружения 0,15 (ОСШ изображения объекта на кадре равно 4), согласно теоретическим предпосылкам вероятность обнаружения 0,90 достигается представляемым алгоритмом на 121-ом кадре, вероятность 0,95 — на 156-ом, вероятность 0,99 — на 237-ом. Исходя из этого, можно сделать вывод, что ОСШ = 4 является предельным рабочим значением уровня шумов при использовании представляемого алгоритма (предельное значение ОСШ для предшествующего алгоритма [1] составляло 4,5).

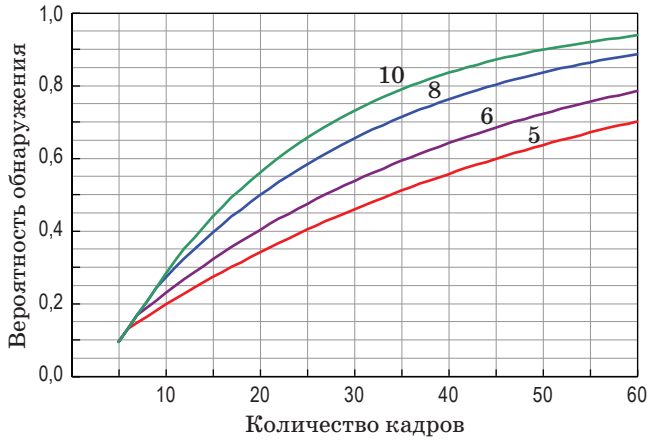


Рис. 2. Зависимости вероятности обнаружения от среднего количества кадров n_B (значение n_B указано числом возле графика)

Fig. 2. Dependences of the detection probability *vs* average number of frames n_B (the n_B values is indicated by the number next the graph)

Дополнительной возможностью увеличить скорость роста вероятности обнаружения с ростом числа обработанных кадров является увеличение размера буферного списка (увеличение значения n_B). Эту возможность иллюстрирует рис. 2, на котором приведены графики роста вероятности обнаружения для кадров с ОСШ = 4 при значениях n_B от 5 до 10.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПО СЕРИИ МОДЕЛЬНЫХ КАДРОВ

Как и в случае, приведенном в публикации [1], тестирование алгоритма межкадровой обработки выполнялось по сериям модельных кадров, для генерации которых использовался подход, изложенный в работе [19]. Имитировалась система наблюдения, работающая в инфракрасном диапазоне спектра. Модельные кадры генерировались с учетом случайного характера регистрации приходящего излучения, реализации нормального случайного процесса для шума, обусловленного тепловым излучением элементов оптической системы, собственных шумов фотоприемной матрицы, включая остаточный геометрический шум и шум считывания. Задачей тестирования была оценка количества кадров последовательности, необходимого для достижения заданной вероятности обнаружения точечных объектов с различными значениями ОСШ (с различной вероятностью обнаружения объекта на единичном кадре). Заметим, что при определении сигнальной составляющей в ОСШ учитывалась вся излучаемая объектом энергия, дошедшая до фокальной плоскости с учетом эффектов ослабления и размытия сигнала оптической системой, а также ее преобразования в зарядовые пакеты, накапливаемые чувствительными элементами в соответствии с квантовой эффективностью фотоприемника.

Для тестирования были сгенерированы последовательности из 300 кадров для приближающихся объектов с ОСШ в стартовой точке от 4,0 до 6,0 с шагом 0,5. Общее число объ-

ектов для каждого значения ОСШ составило 100 штук. Обработка тестовых кадров с формированием списка обнаруженных в кадре отметок выполнялась алгоритмом [17]. Параметры алгоритма настраивались так, чтобы на фрагменте 128×128 пикселов в среднем были 3,5 ложные отметки. На рис. 3 приведены примеры фрагментов тестовой последовательности из восьми кадров. Изображения на рис. 3а содержат объект с ОСШ = 5. Кадровый алгоритм обнаружил объект на 1, 6 и 7 кадрах представленной последовательности. Изображения на рис. 3б содержат объект с ОСШ = 6. Кадровый алгоритм обнаружил объект на 2, 3, 7 и 8 кадрах представленной последовательности.

Оценка вероятности обнаружения p_i для i-го кадра тестовых последовательностей выполнялась по следующей формуле:

$$p_i = \frac{n_i}{n_\Sigma}, \tag{20}$$

где n_i — количество объектов, занесенных в список целей после обработки i-го кадра, n_Σ — общее количество объектов.

Результаты тестирования представлены в таблице, в которой приводится число кадров,

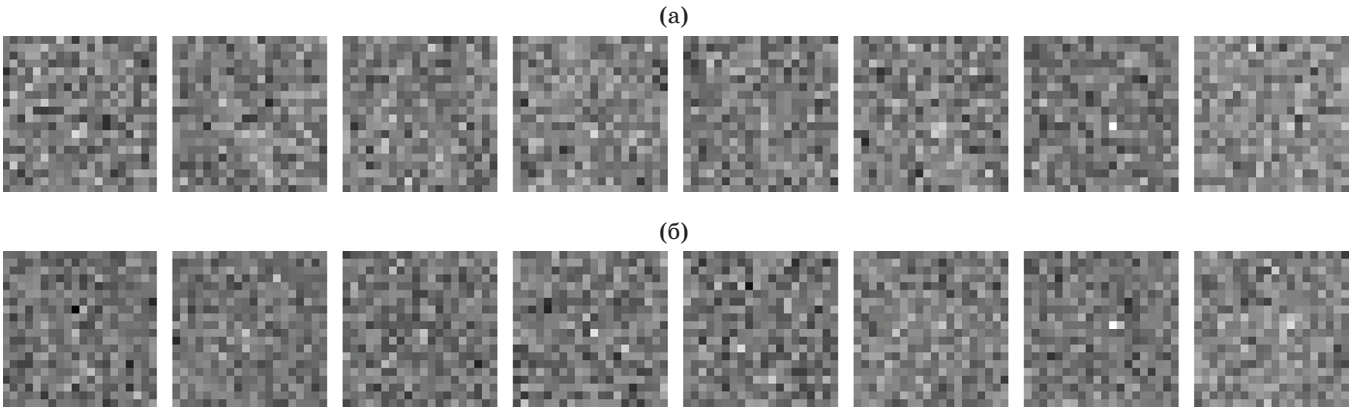


Рис. 3. Пример фрагментов последовательности кадров с изображениями объекта с ОСШ = 5 (а) и с ОСШ = 6 (б)

Fig. 3. An example of a frame sequence fragments with an images of object (a) with signal-to-noise ratio = 5 and (б) with signal-to-noise ratio = 6

Оцениваемые показатели в зависимости от ОСШ изображений объектов
Estimated features in relation to signal-to-noise ratio of the object images

Оцениваемые показатели	**ОСШ объектов**				
	4,0	**4,5**	**5,0**	**5,5**	**6,0**
Вероятность обнаружения объекта на единичном кадре алгоритмом [17]	0,14	0,22	0,31	0,41	0,51
Количество кадров для достижения вероятности обнаружения 0,90 алгоритмом [1] и **представляемым алгоритмом**	218 **113**	101 **53**	48 **30**	28 **19**	19 **16**
Количество кадров для достижения вероятности обнаружения 0,95 алгоритмом [1] и **представляемым алгоритмом**	252 **128**	124 **60**	65 **36**	35 **22**	21 **17**
Количество кадров для достижения вероятности обнаружения 0,99 алгоритмом [1] и **представляемым алгоритмом**	277 **205**	144 **77**	87 **41**	43 **32**	28 **23**

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значения, полученные представляемым алгоритмом.
Note. The values obtained by the presented algorithm are highlighted in bold.

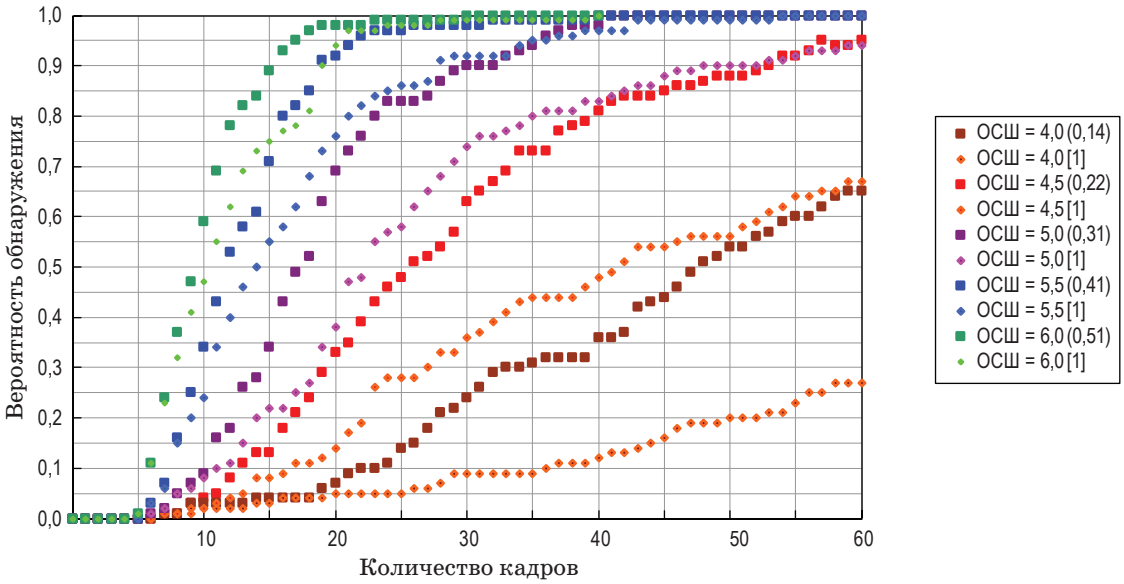


Рис. 4. Результаты оценки вероятности обнаружения последовательности тестовых изображений объектов с различными значениями ОСШ представляемым алгоритмом (крупные квадратные маркеры) и алгоритмом [1] (мелкие ромбовидные маркеры). В скобках указана вероятность обнаружения объекта на единичном кадре

Fig. 4. Results of estimating the detection probability of a sequence of test images of objects with different values of the signal-to-noise ratio by presented algorithm (large square markers) and the algorithm [1] (small diamond-shaped markers). The detection probability of an object in a single frame is indicated in parentheses

необходимое для достижения вероятностей обнаружения 0,90, 0,95 и 0,99 представляемым алгоритмом и алгоритмом [1] точечных объектов с различными значениями ОСШ. Для справки в таблице приведены вероятности обнаружения объекта на единичном кадре алгоритмом [17]. На рис. 4 приведен фрагмент зависимости вероятности обнаружения для первых 60 кадров тестовых последовательностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен алгоритм обнаружения и сопровождения движущихся слабоизлучающих точечных объектов, который является развитием метода [1] и позволяет выполнять обработку изображений с низкими значениями ОСШ, приближая эффективность традиционных последовательных методов к эффективности методов «*Track-Before-Detect*».

Основная особенность и новизна предлагаемого подхода — это оперирование при обработке последовательности кадров с иерархической системой списков объектов: списком целей, инициальным и буферным списками. Буферный список служит для фильтрации ложных кадровых отметок, инициальный список предназначается для фильтрации ложных траекторий, а в списке целей собираются статистически достоверные объекты для отслеживания и подсчета характеристик. Данная особенность позволяет заметно сократить количество кадров, необходимых для достижения заданной вероятности обнаружения слабоизлучающих точечных объектов по сравнению со своим предшественником [1] (например, для объектов с ОСШ = 4,5 количество обработанных кадров для достижения заданной вероятности в диапазоне от 0,90 до 0,99 сокращается приблизительно в 2 раза).

Работоспособность предложенного метода подтверждается проведенными статистическими экспериментами с использованием временной последовательности модельных кадров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Меденников П.А., Павлов Н.И. Обнаружение и сопровождение точечных слабоизлучающих объектов на основе анализа последовательности минисерий изображений // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 12. С. 50–58. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-50-58
   Medennikov P.A., Pavlov N.I. Detection and tracking of weakly emitting point objects, based on the analysis of a sequence of miniseries of images // J. Opt. Technol. 2021. V. 88. № 12. P. 716–721. https://doi.org/10.1364/JOT.88.000716
2. Bar-Shalom Y., Li X.-R. Multitarget-multisensor tracking: Principles and techniques. Storrs: YBS Publ., 1995. 615 p.
3. Blackman S.S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Boston: Artech House, 1999. 1232 p.
4. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 164 с.
   Konovalov A.A. Base of tracking processing of radiolocation data. P. 1 [in Russian]. St. Petersburg: St. Petersburg GETU «LETI» Publ., 2013. 164 p.
5. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 2. СПб.: изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 180 с.
   Konovalov A.A. Base of tracking processing of radiolocation data. P. 4 [in Russian]. St. Petersburg: St. Petersburg GETU "LETI" Publ., 2014. 180 p.
6. Фисенко В.Т., Можейко В.И., Фисенко Т.Ю. и др. Метод автоматического обнаружения и прослеживания многих малоразмерных объектов в условиях априорной неопределенности // Изв. вузов, Приборостроение. 2014. Т. 57. № 10. С. 17–22.
   Fisenko V.T., Mozhezeiko V.I., Fisenko T.Yu., et al. Method of automatically detecting and tracking many small objects under conditions of a priori indeterminacy [in Russian] // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved, Prib. (News of higher educational institutions, Instrument engineering). 2014. V. 57. № 10. P. 17–22.
7. Kingston R.H. Detection of optical and infrared radiation. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978. 140 p.
8. Hadzagic M., Michalska H., and Lefebvre E. Track-before detect methods in tracking low-observable targets: A survey // Sensor & Transducers M. (S&T e-Digest). Special Issue. August 2005. P. 374–380.
9. Ristic B., Arulampalam S., and Gordon N. Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications. Washington DC: Artech House, 2004. 318 p.
10. Nichtern O. and Rotman S.R. Parameter adjustment for a dynamic programming track-before-detect-based target detection algorithm // J. Adv. in Sig. Process. 2008. (ID 146925). P. 1–19. https://doi.org/10.1155/2008/146925
11. Hoonkyung Cho, Joohwan Chun. A new TVD-DP algorithm using multiple IR sensors to locate the target launch point // Proc. SPIE. 2015. V. 8185. P. 8185OP-1–8185OP-14.
12. Huanhai Yang. Detection and tracking of infrared dim small image sequence moving target // The Open Automation and Control Systems J. 2015. № 7. P. 1698–1704.
13. Bendong Zhao, Shanzhu Xiao, Huanzhang Lu, et al. Point target detection in space-based infrared imaging system based on multi-direction filtering fusion // Progress in Electromagnetics Res. M. 2017. V. 56. P. 145–156.
14. Yi W., Fang Z., Li W., et al. Multi-frame track-before-detect algorithm for maneuvering target tracking // IEEE Trans. Vehicular Technol. 2020. V. 69. № 4. P. 4104–4118.
15. Беренков Н.Р., Тартаковский А.Г. Эффективные алгоритмы выделения слаборазличимых следов космических объектов // Труды МФТИ. 2020. Т. 12. № 2. С. 5–20.
   Berenkov N.R. and Tartakovski A.G., Effective algorithms for distinguishing weakly distinguishable tracks of space objects [in Russian] // Trudy Mosk. Fiz.-Tekhnich. Inst. (Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology). 2020. V. 12. № 2. P. 5–20.
16. Mazurek P. Convolutional neural network reference for track-before-detect-based target detection application // Remote Sens. 2023. V. 15(4629). P. 1–17. https://doi.org/10.3390/rs15184629
17. Меденников П.А. Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 65–69. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-65-69
   Medennikov P.A. Algorithm for detecting and determining the coordinates of a point object // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 8. P. 510–514. https://doi.org/10.1364/JOT.86.000510
18. Соболев А.А. Сравнение быстродействия методов решения задачи о назначениях при селекции в траекторной обработке // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2023. № 2. С. 81–89. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-81-89
   Sobolev A.A. Performance comparison of the methods for solving the assignment problem in selection of tracking data processing [in Russian] // Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antey". (Bulletin of the Almaz-Antey Aerospace Defense Concern). 2023. № 2. P. 81–89. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-81-89
19. Абакумова А.А., Малинова Т.П., Меденников П.А. и др. Программно-алгоритмический комплекс имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем наблюдения // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 56–64. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-56-64
   Abakumova A.A., Malinova T.P., Medennikov P.A., et al. Algorithmic simulation-modeling software complex for the investigation and development of optoelectronic observation systems // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 8. P. 503–509. https://doi.org/10.1364/JOT.86.000503

АВТОРЫ

Павел Александрович Меденников — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; https://orcid.org/0009-0002-3463-2113; medennik@rambler.ru

Николай Ильич Павлов — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; https://orcid.org/0000-0002-1641-8319; pavlovNI@niioep.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2024
Одобрена после рецензирования 29.05.2024
Принята к печати 30.09.2024

AUTHORS

Pavel A. Medennikov — PhD (Engineering), Leading Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; https://orcid.org/0009-0002-3463-2113; medennik@rambler.ru

Nikolai I. Pavlov — Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director in Science, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; https://orcid.org/0000-0002-1641-8319; pavlovNI@niioep.ru

The article was submitted to the editorial office 02.02.2024
Approved after review 29.05.2024
Accepted for publication 30.09.2024